

# Deutung des Verlaufs der Eichkurven von EHRINGHAUS-(Quarz-)Kompensatoren

Rath, Robert

Veröffentlicht in:  
Abhandlungen der Braunschweigischen  
Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 10, 1958, S.9-24



Friedr. Vieweg & Sohn, Braunschweig

# Deutung des Verlaufs der Eichkurven von EHRINGHAUS-(Quarz-) Kompensatoren

Von Robert Rath, Hannover

Vorgelegt von Herrn Fr. Buschendorf

(Eingegangen am 23. Mai 1958)

*Summary: Provement, that the curves occuring during the gauging standardization of EHRINGHAUS quartz compensators can be explained by the combination of errors of observation, errors of thickness, and errors of parallelism. The error of manufacture, which is based on a slight optical misorientation of the quartz plates which bring about the compensation and the effect of optical activity are of no important influence on the erroneous curves.*

**Übersicht:** Rekonstruktion des Eichkurvenverlaufs durch Kombination von Dicken-, Keil- und Messungsfehlern. Nachweis, daß kleine Fehler in der optischen Orientierung der Plättchen in bezug auf ihre Indexflächen als auch in der gegenseitigen optischen Orientierung der Plättchen nicht ins Gewicht fallen.

## 1. Elliptische Polarisierung; Kompensation und Kompensatoren

Ein Bündel homogenen, parallelen, linear polarisierten Lichts durchsetze ein Kristallplättchen. Die Bündel-(= Tubus-)Achse stehe auf dem Plättchen senkrecht; das Plättchen sei in Richtung dieser Achse optisch anisotrop. Die Schwingung:

$$x = X \sin \left( 2 \pi \frac{s_x}{\lambda} \right)$$

wird beim Übergang in das Plättchen in die beiden Komponenten:

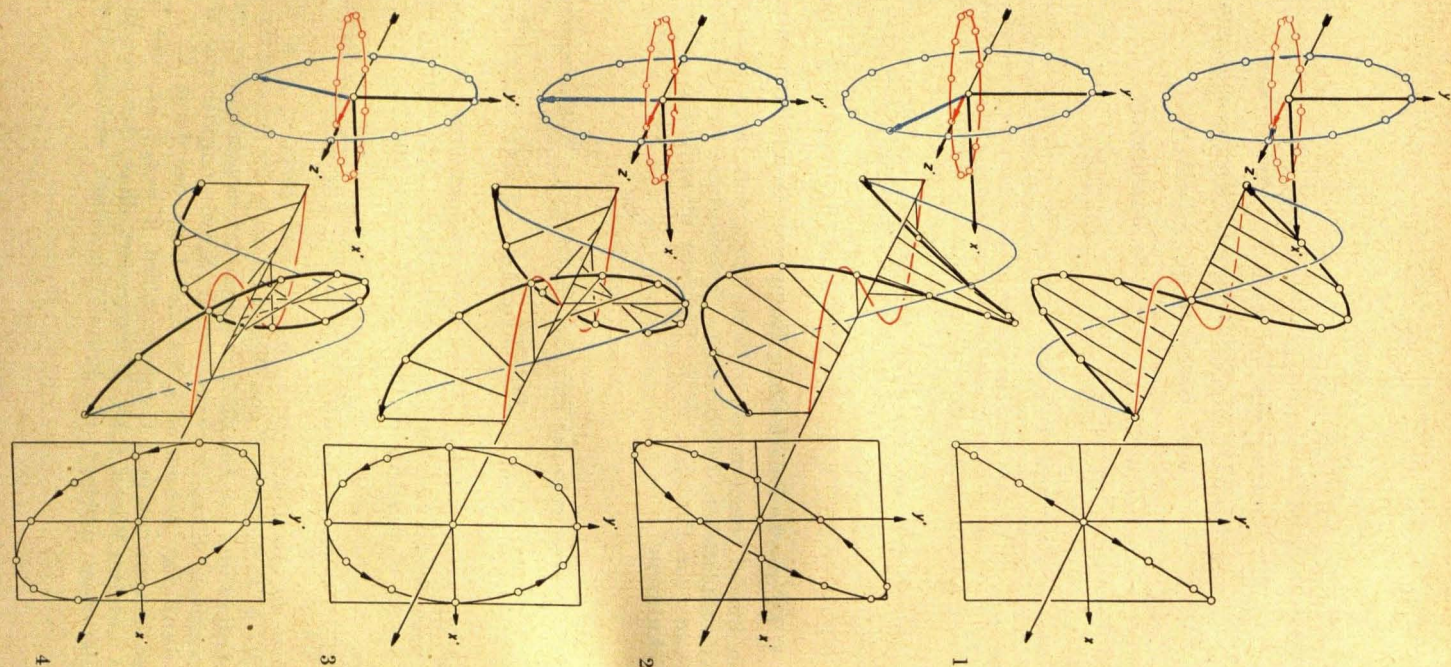
$$x' = X \cos \xi' \sin \left( 2 \pi \frac{s_x - s_{x'}}{\lambda} \right) \text{ und } y' = X \sin \xi' \sin \left( 2 \pi \frac{s_x - s_{y'}}{\lambda} \right)$$

zerlegt. Sie setzen sich beim Übergang in Luft zu einer im allgemeinen elliptisch polarisierten Resultierenden zusammen (s. Abb. 1 bis 8). Die Gleichung ihrer auf die Wellenebene projizierten Bahnkurve lautet:

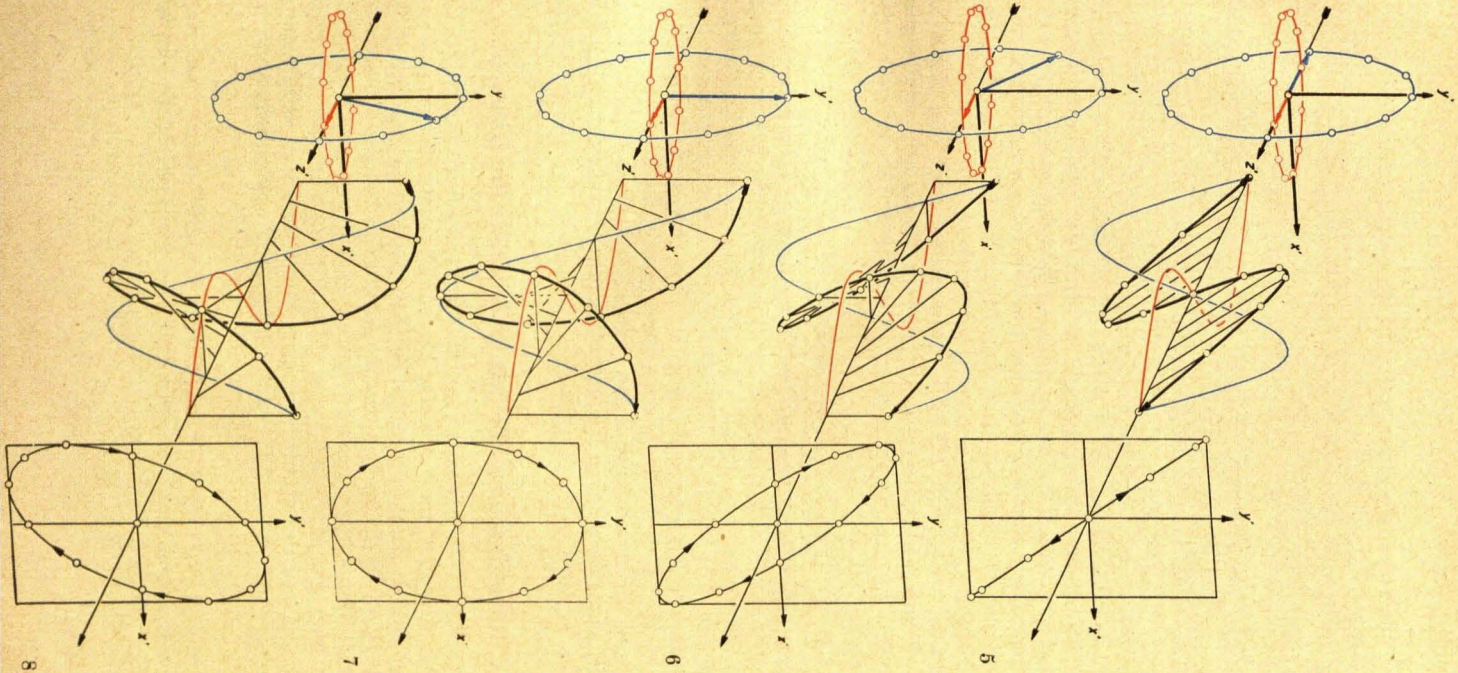
$$\frac{x'^2}{X^2 \cos^2 \xi'} - 2 \frac{x' y'}{X^2 \sin \xi' \cos \xi'} \cos \left( 2 \pi \frac{s_{x'} - s_{y'}}{\lambda} \right) + \frac{y'^2}{X^2 \sin^2 \xi'} = \sin^2 \left( 2 \pi \frac{s_{x'} - s_{y'}}{\lambda} \right). \quad (1)$$

$X$  kürzt die Amplitude ab;  $s_x, s_{x'}, s_{y'}$  sind Wege,  $x, x', y'$  Elongationen.  $\lambda$  stellt die Wellenlänge,  $\xi'$  den Winkel zwischen der Schwingungsrichtung des Polarisators und der bei Blick entgegen den eingezeichneten langen Pfeilen im positiven Sinne nächstfolgenden Schwingungsrichtung des Kristallplättchens dar. Achsenverhältnis und Lage der durch Gl. 1 bestimmten Ellipse hängen von dem Gangunterschied  $R' = s_{x'} - s_{y'}$  des Kristallplättchens und dem Winkel  $\xi'$  ab.  $R'$  interessiert, da er, durch die Dicke des Kristallplättchens dividiert, die kristalldiagnostisch wichtige Doppelbrechung

Abb. 1 bis 8: Zusammensetzung zweier zueinander senkrechter Schwingungen gleicher Wellenlängen aber verschiedener Amplituden. Je nach der Phasendifferenz (gezeichnet sind die Fälle  $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 30^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ,  $\varphi = 120^\circ$ ,  $\varphi = 180^\circ$ ,  $\varphi = 210^\circ$ ,  $\varphi = 270^\circ$ ,  $\varphi = 300^\circ$ ) zwischen den farbig gedruckten Komponenten ergeben sich (in derselben Reihenfolge) eine linear, drei linkselliptisch, wieder eine linear und dann drei rechtselliptisch polarisierte Resultierende (dicke schwarze Kurven).







liefert.  $\xi'$  darf deshalb einen festen Wert annehmen. Wählt man  $\xi' = \pi/4$ , so erhält man:

$$\frac{x'^2}{X^2 \sin^2 \xi'} - 2 \frac{x' y'}{X^2 \sin^2 \xi'} \cos \left( 2 \pi \frac{s_{x'} - s_{y'}}{\lambda} \right) + \frac{y'^2}{X^2 \sin^2 \xi'} = \sin^2 \left( 2 \pi \frac{s_{x'} - s_{y'}}{\lambda} \right),$$

damit Schwingungsformen, deren Hauptachsen der Schwingungsrichtung des Polarisators und der zu dieser senkrechten Richtung parallel sind (*BURRI*, [1], S. 121). Das Kompensationsverfahren beruht auf der Möglichkeit, linear polarisierte Schwingungen mit Hilfe des Analysators zu erkennen und besteht in der Addition oder Subtraktion eines Gangunterschieds  $R$ , der gerade so groß ist, daß die Summe  $R' + R$  oder die Differenz  $R' - R$  eine linear polarisierte Schwingung hervorbringt.  $R$  wird bei Drehkompensatoren durch Drehung eines optisch anisotropen Kristallplättchens erzeugt und durch Ablesung des Drehungs(= Lichtaustritts-)Winkels gemessen. Dem Umstand der Verfügbarkeit zweier optisch einachsiger Werkstoffe entsprechend gibt es zwei Ausführungsformen solcher Drehkompensatoren: den ein Kalkspatplättchen enthaltenden *BEREK*-Kompensator und den *EHRINGHAUS*-(Quarz-)Kompensator, der aus zwei je 1 mm dicken, achsparallel geschliffenen und in Subtraktionsstellung zu einer „Kombinationsplatte“ verkitteten Quarzplättchen besteht ([2], [3]).

Eicht man einen *EHRINGHAUS*-(Quarz-)Kompensator, so ergeben die arithmetischen Mittelwerte  $\alpha_M$  der Austrittswinkel Gangunterschiede, die im allgemeinen um  $\Delta R$  kleiner oder größer sind als die zu erwartenden. In der unter [4] zitierten Arbeit von *MOSEBACH* ist eine solche Eichkurve  $\Delta R = f(R)$  reproduziert (Abb. 3 auf S. 523). Die Kurve alterniert sinusähnlich um eine nach größeren  $R$  ansteigende Gerade; ihre Amplitude beträgt  $1,5 \mu$ , ihre Periode 2 bis  $2,5 \lambda$ . Im Folgenden wird jeweils ein Fehler angenommen, die Auswirkung dieses Fehlers auf das Ergebnis berechnet und versucht, den Verlauf der Eichkurve durch Kombination der Abweichungen  $\Delta R$  zu rekonstruieren.

## 2. Auswirkung von Fehlern in der Dicke der Quarzplättchen

*EHRINGHAUS* hat berechnet, daß bei einer  $5 \mu$  zu geringen Dicke eines jeden der beiden Quarzplättchen ein bei Kompensation auf  $R = 1 \lambda$ ; ...;  $7 \lambda$  um  $0,058^\circ$ ; ...;  $0,284^\circ$  zu großer Austrittswinkel resultiert ([3], Tab. III auf S. 401). Mit Hilfe der Funktionstabelle findet man in den herausgegriffenen Fällen die Gangunterschiedsdifferenzen  $+ 2,98 \mu$  und  $+ 20,71 \mu$ . Subtrahiert man die zu  $R = 1 \lambda$  und  $R = 2 \lambda$ ; ...; zu  $R = 6 \lambda$  und  $R = 7 \lambda$  gehörigen Gangunterschiedsdifferenzen voneinander, so erhält man (in  $\mu$ ) die Werte: 2,97; 2,90; 3,03; 3,27; 2,64; 2,92, gleichbedeutend mit einem näherungsweise linearen Verlauf der Kurve  $\Delta R = f(R)$ .

Das von *EHRINGHAUS* angeführte Beispiel ist ein Sonderfall des allgemeinen Problems, daß die beiden Plättchen nicht gleich, sondern verschieden große Fehlbeträge in der Dicke aufweisen. Dann ist (z. B. statt der 6. Gleichung auf S. 145 bei *BURRI*, [1]):

$$R = R_1 - R_2 =$$

$$= D_1 \left( \sqrt{n_E^2 - \sin^2 \alpha_D} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_D} \right) - D_2 \left( \frac{n_E}{n_0} \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_D} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_D} \right)$$

zu setzen.  $D_1$  und  $D_2$  bedeuten die von  $D_0 = 10^6 \text{ m } \mu$  abweichenden Dicken des (in Richtung des Lichtwegs) ersten und zweiten Quarzplättchens. Diese veränderten Dicken bewirken, daß die Kompensation nicht in Richtungen erfolgt, deren Winkeldifferenzen  $= 2\alpha$  sind, sondern in Richtungen, die miteinander die Winkel  $2\alpha_D$  einschließen. Zu diesen  $\alpha_D$  aber liefert die Funktionstabelle die von  $(k/2) \lambda$  abweichenden Gangunterschiede  $R_D$ . Demnach ist der Ansatz nach  $\sin \alpha_D$  aufzulösen. Führt man aus Symmetriegründen die Abkürzung:

$$D = D_1 - D_2 \left( 1 - \frac{n_E}{n_0} \right)$$

ein, und schreibt man:

$$A = D_1^2 + D^2, B = D_1^2 n_E^2 + D^2 n_0^2,$$

$$a = D_1^2 - D^2, b = D_1^2 n_E^2 - D^2 n_0^2,$$

so ergibt sich die biquadratische Gleichung:

$$a^2 \sin^4 \alpha_D + 2 (A R^2 - a b) \sin^2 \alpha_D + R^4 - 2 B R^2 + b^2 = 0. \quad (2)$$

Sie geht in den strengen, von EHRINGHAUS abgeleiteten Ausdruck über, wenn man  $D_0 = D_1 = D_2$  einführt, die Identitäten  $D_0 \equiv d$ ,  $\alpha \equiv i$ ,  $n_E \equiv \varepsilon$ ,  $n_0 \equiv \omega$  beachtet und  $R$  als Produkt der Zahl  $\Delta F$  und der Wellenlänge  $\lambda$  auffaßt ([2], Gl. 7 auf S. 319).

Gl. 2 wurde für die 25 Kombinationen der fünf (in  $\text{m } \mu$  gerechneten) Dickenwerte 997 000; 998 500; 1 000 000; 1 001 500; 1 003 000 und jeweils die Verhältnisse  $\lambda = 589,3 \text{ m } \mu$ ,  $R = 0,5 \lambda$ ; ...;  $7 \lambda$  gelöst. Die Abweichungen  $\Delta R_D$  der Mittelwerte der beiden reellen Lösungen sind in Tab. 1 aufgeführt.

$D_1 < D_2$  hat zu große,  $D_1 > D_2$  zu kleine Gangunterschiedswerte zur Folge. Kombinationen von  $D_1$  und  $D_2$ , die um gleich große Beträge von  $D_0$  entfernt liegen (z. B.  $D_1 = D_2 = 997 000 \text{ m } \mu$  in der ersten und  $D_1 = D_2 = 1 003 000 \text{ m } \mu$  in der letzten Reihe) führen auf näherungsweise gleich große Differenzen

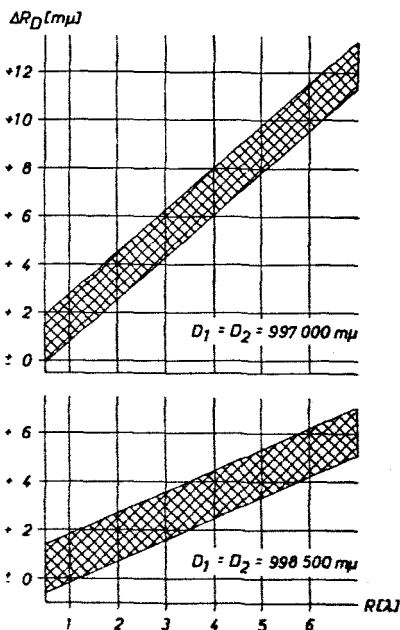


Abb. 9: Bereiche, in denen die Eichkurve verläuft, wenn die beiden Quarzplättchen  $3 000 \text{ m } \mu$  oder  $1 500 \text{ m } \mu$  zu dünn geschliffen werden und kein anderer Fehler vorliegt. Die Zeichnung gilt für  $\lambda = 589,3 \text{ m } \mu$ .

Tabelle 1

Abweichungen  $\Delta R_D$  [ $m\mu$ ] vom eingestellten Gangunterschied  $R = (k/2)\lambda$ . Die tabellierten Abweichungen ergeben sich, wenn die beiden Quarzplättchen von  $D_0 = 10^6 m\mu$  verschiedene Dicken  $D_1$  und  $D_2$  aufweisen.

$D_1$	$D_2$	$R$													
		0,5 $\lambda$	1 $\lambda$	1,5 $\lambda$	2 $\lambda$	2,5 $\lambda$	3 $\lambda$	3,5 $\lambda$	4 $\lambda$	4,5 $\lambda$	5 $\lambda$	5,5 $\lambda$	6 $\lambda$	6,5 $\lambda$	7 $\lambda$
997 000	997 000	+ 0,9	+ 2,0	+ 2,7	+ 3,7	+ 4,6	+ 5,4	+ 6,2	+ 7,0	+ 8,1	+ 9,0	+ 9,9	+10,6	+11,5	+12,3
	998 500	+14,7	+15,4	+15,8	+16,6	+17,2	+17,9	+18,4	+19,1	+19,9	+20,7	+21,3	+21,9	+22,6	+23,4
	1 000 000	+28,0	+28,5	+28,9	+29,4	+29,9	+30,3	+30,7	+31,1	+31,7	+32,3	+32,8	+33,3	+33,7	+34,4
	1 001 500	+41,2	+41,6	+41,9	+42,2	+42,5	+42,7	+42,9	+43,2	+43,5	+43,8	+44,2	+44,5	+45,0	+45,3
	1 003 000	+54,6	+54,8	+54,8	+55,0	+55,1	+55,0	+55,1	+55,2	+55,3	+55,4	+55,6	+55,7	+56,0	+56,1
998 500	997 000	-13,2	-12,5	-11,6	-11,0	-10,4	- 9,7	- 9,1	- 8,5	- 7,7	- 7,1	- 6,5	- 6,0	- 5,3	- 4,9
	998 500	+ 0,4	+ 1,1	+ 1,4	+ 1,8	+ 2,4	+ 2,7	+ 3,1	+ 3,5	+ 4,2	+ 4,6	+ 5,0	+ 5,3	+ 5,7	+ 6,1
	1 000 000	+14,2	+14,4	+14,5	+14,7	+15,0	+15,1	+15,3	+15,5	+15,9	+16,2	+16,5	+16,6	+16,7	+17,1
	1 001 500	+27,5	+27,6	+27,5	+27,6	+27,6	+27,6	+27,6	+27,6	+27,7	+27,8	+27,9	+27,9	+27,8	+28,2
	1 003 000	+40,7	+40,6	+40,5	+40,4	+40,2	+39,9	+39,7	+39,5	+39,5	+39,4	+39,3	+39,2	+39,0	+39,2
1 000 000	997 000	-26,9	-26,4	-25,9	-25,6	-25,2	-24,7	-24,4	-24,0	-23,5	-23,3	-22,8	-22,4	-22,1	-21,9
	998 500	-13,6	-13,3	-13,0	-12,8	-12,6	-12,3	-12,2	-12,0	-11,6	-11,5	-11,4	-11,2	-11,0	-11,1
	1 000 000	- 0,0	+ 0,2	$\pm$ 0	+ 0,0	+ 0,1	+ 0,0	+ 0,0	- 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,0	+ 0,0	+ 0,2
	1 001 500	+13,7	+13,6	+13,1	+13,0	+12,8	+12,5	+12,2	+12,0	+12,0	+11,8	+11,6	+11,2	+11,0	+10,8
	1 003 000	+27,0	+26,7	+26,2	+25,8	+25,3	+24,9	+24,4	+24,0	+23,7	+23,4	+23,0	+22,5	+22,0	+21,8
1 001 500	997 000	-40,6	-40,5	-40,2	-40,1	-40,0	-39,8	-39,7	-39,6	-39,3	-39,3	-39,2	-38,9	-38,8	-38,7
	998 500	-27,3	-27,3	-27,2	-27,2	-27,3	-27,4	-27,5	-27,5	-27,5	-27,6	-27,7	-27,7	-27,8	-28,0
	1 000 000	-14,0	-14,2	-14,2	-14,5	-14,7	-14,9	-15,3	-15,6	-15,7	-16,0	-16,2	-16,4	-16,7	-17,2
	1 001 500	- 0,5	- 0,7	- 1,3	- 1,8	- 2,1	- 2,6	- 3,1	- 3,6	- 3,8	- 4,3	- 4,8	- 5,3	- 5,7	- 6,4
	1 003 000	+13,2	+12,6	+11,8	+11,2	+10,5	+ 9,8	+ 9,1	+ 8,4	+ 7,9	+ 7,3	+ 6,7	+ 5,9	+ 5,3	+ 4,6
1 003 000	997 000	-54,5	-54,4	-54,4	-54,6	-54,8	-54,7	-55,0	-55,0	-55,0	-55,2	-55,4	-55,4	-55,6	-55,8
	998 500	-41,0	-41,3	-41,5	-41,8	-42,2	-42,4	-42,7	-43,0	-43,2	-43,6	-44,0	-44,1	-44,5	-44,9
	1 000 000	-27,7	-28,1	-28,5	-29,0	-29,5	-29,9	-30,5	-31,0	-31,4	-32,0	-32,5	-32,9	-33,5	-34,0
	1 001 500	-14,5	-15,0	-15,6	-16,3	-16,9	-17,6	-18,3	-19,6	-19,6	-20,4	-21,0	-21,7	-22,4	-23,2
	1 003 000	- 1,0	- 1,6	- 2,8	- 3,5	- 4,2	- 5,2	- 6,2	- 7,1	- 7,5	- 8,7	- 9,6	-10,6	-11,4	-12,4

Robert Rath

$\Delta R_D$ -Verglichen mit der *MOSEBACH*schen Kurve als auch eigenen Messungsergebnissen kommen die Kombinationen  $D_1 = D_2 = 997\,000\text{ m}\mu$  und  $D_1 = D_2 = 998\,500\text{ m}\mu$  den tatsächlichen Verhältnissen am nächsten. Offenbar wird der Sollwert vom Hersteller eher unter- als überschritten, während Dickendifferenzen von der Größe der angenommenen kaum auftreten. Nimmt man (s. auch Kurve *E 4*,  $\Delta Fm$  in Abb. 1 auf S. 517 bei *MOSEBACH*, [4]) an, daß der mittlere Fehler des Mittelwerts von 10 Einstellungen sich im ganzen Meßbereich als eine etwa  $1\text{ m}\mu$  große Unsicherheit auswirkt, so müßten die Eichkurven innerhalb der beiden in Abb. 9 durch Kreuzschraffur gekennzeichneten Streifen verlaufen. Die Betrachtung der durch Fehler in der Dicke der Quarzplättchen verursachten Abweichungen reicht demnach nur zur Erklärung des Anstiegs der durch die Eichkurve gelegten Gerade aus.

### 3. Auswirkung von Keilfehlern

Die gute Übereinstimmung der Dicken beider Plättchen schließt nicht aus, daß Keilfehler auftreten. Wegen der Keilform weicht der Austritts- vom Einfallswinkel ab, erfolgt ferner die Kompensation in Richtungen, die mit den exakten nicht übereinstimmen.

Um zu einem nicht allzu komplizierten Ansatz zu kommen, werde zunächst ein optisch isotroper Keil mit der Brechungszahl 1,55 und dem brechenden Winkel  $\gamma$  betrachtet. Zu Einfallswinkeln zwischen  $\pm 10$  und  $\pm 70^\circ$  errechnen sich die zur Tab. 2 zusammengefaßten Paare von Austrittswinkeln und Mittelwerte.

Tabelle 2

Größe der Austrittswinkel und ihrer arithmetischen Mittelwerte (eingerahmt), wenn das Licht unter Einfallswinkeln zwischen  $\pm 10$  und  $\pm 70^\circ$  in einen Keil einfällt, dessen brechender Winkel  $\gamma$  ist und dessen Brechungszahl 1,55 beträgt.

Einfallswinkel	$\gamma = 1'$			$\gamma = 10'$		
10°	9,974°	10,026°	10,000°	9,739°	10,261°	10,000°
20	19,973	20,026	20,000	19,732	20,268	20,000
30	29,972	30,028	30,000	29,718	30,283	30,000
40	39,969	40,031	40,000	39,694	40,308	40,001
50	49,965	50,035	50,000	49,652	50,351	50,002
60	59,957	60,043	60,000	59,574	60,431	60,002
70	69,940	70,061	70,000	69,407	70,609	70,008

Zwar ergeben sich bei positivem und bei negativem Einfallswinkel verschiedene Werte für den Austrittswinkel, doch stimmt der Mittelwert bei kleinen  $\gamma$  mit der Vorgabe überein. Da sich zudem die Differenzen in Abhängigkeit vom Einfallswinkel nur wenig ändern (z. B. um nur drei Einheiten der dritten Dezimale im Intervall 30 bis  $40^\circ$  bei  $\gamma = 1'$ ), würde die Berücksichtigung der durch den Keil modifizierten Brechungsverhältnisse einen in seinen charakteristischen Eigenschaften gleichartigen Kurvenverlauf hervorbringen. Es erscheint daher zulässig, das allgemeine Modell einer aus zwei Keilen gefügten „Kombinationsplatte“ in folgender Weise zu vereinfachen.

Die obere Grenzfläche des unteren (in Richtung der Lichtfortpflanzung ersten) Plättchens und die untere Grenzfläche des oberen Plättchens sollen wie bei



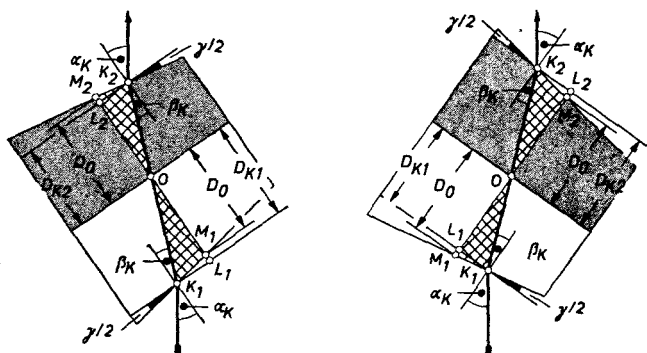


Abb. 10: Schemata zur Berechnung der Dicken einer aus zwei Keilen bestehenden „Kombinationsplatte“ an sich entsprechenden Kompensationsstellen.

Fehlerfreiheit der Meßanordnung geschliffen sein (Abb. 10). Die brechenden Kanten beider Keile sollen koinzidieren und der Drehungsachse des Kompensators parallel sein; die brechenden Winkel sollen beide den Wert  $\gamma/2$  besitzen. Des weiteren werde noch die Festsetzung getroffen, daß jeder Keil in Richtung der in O errichteten Normale ( $OM_1$  bzw.  $OM_2$ ) gerade die Dicke  $D_0 = 10^6 \text{ m}\mu$  aufweise und gegen Luft nicht mit einer (wie gezeichnet) ebenen, sondern mit einer treppenförmigen Grenzfläche abschließe. Die durch die Kompensationsstellen  $K_1$  und  $K_2$  verlaufenden Stufen sind durch die Parallelen  $K_1 L_1$  und  $K_2 L_2$  angedeutet. Gleichungen für die Dicken  $D_{K1}$  und  $D_{K2}$  an diesen Stellen erhält man auf folgendem Wege. Nach Abb. 10 links ist:

$$D_{K1} = D_0 + \overline{L_1 M_1} \quad \text{und} \quad D_{K2} = D_0 - \overline{L_2 M_2}.$$

Aus

$$\Delta K_1 L_1 M_1$$

$$\Delta K_2 L_2 M_2$$

ergibt sich:

$$\overline{L_1 M_1} = \overline{K_1 M_1} \sin \frac{\gamma}{2},$$

$$\overline{L_2 M_2} = \overline{K_2 M_2} \sin \frac{\gamma}{2},$$

aus (dem kreuzschraffierten)

$$\Delta K_1 M_1 O:$$

$$\Delta K_2 M_2 O:$$

$$\overline{K_1 M_1} = D_0 \frac{\sin \beta_K}{\cos \left( \beta_K + \frac{\gamma}{2} \right)},$$

$$\overline{K_2 M_2} = D_0 \frac{\sin \beta_K}{\cos \left( \beta_K - \frac{\gamma}{2} \right)}.$$

$\beta_K$ , der unter den vereinfachten Verhältnissen gültige Brechungswinkel, läßt sich durch  $\sin \beta_K = \sin \alpha_K / n_0$  und  $\cos \beta_K = \sqrt{1 - (\sin^2 \alpha_K / n_0^2)}$  mit der ordentlichen Hauptbrechungszahl von Quarz korrelieren. Es ergibt sich:

$$D_{K1} = D_0 \left( \frac{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K}}{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K - \sin \alpha_K \tan \frac{\gamma}{2}}} \right), \quad D_{K2} = D_0 \left( \frac{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K}}{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K + \sin \alpha_K \tan \frac{\gamma}{2}}} \right)$$

Durch Einführung dieser beiden Dickengleichungen in die „Kompensatorformel“ entsteht:

$$\begin{aligned}
 R &= D_{K1} \left( \sqrt{n_E^2 - \sin^2 \alpha_K} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} \right) - \\
 &\quad - D_{K2} \left( \frac{n_E}{n_0} \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} \right) = \\
 &= D_0 \left( \frac{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K}}{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} - \sin \alpha_K \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} \right) \left( \sqrt{n_E^2 - \sin^2 \alpha_K} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} \right) - \\
 &- D_0 \left( \frac{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K}}{\sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} + \sin \alpha_K \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}} \right) \left( \frac{n_E}{n_0} \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_K} \right).
 \end{aligned}$$

Der Ausdruck ist nach  $\sin \alpha_K$  aufzulösen. Man findet die Gleichung 12. Grades und allgemeiner Form:

$$\begin{aligned}
 &K_{12} \sin^{12} \alpha_K + K_{11} \sin^{11} \alpha_K + K_{10} \sin^{10} \alpha_K + K_9 \sin^9 \alpha_K + K_8 \sin^8 \alpha_K - \\
 &- K_7 \sin^7 \alpha_K + K_6 \sin^6 \alpha_K + K_5 \sin^5 \alpha_K + K_4 \sin^4 \alpha_K - K_3 \sin^3 \alpha_K + \\
 &\quad + K_2 \sin^2 \alpha_K + K_1 \sin \alpha_K + K_0 = 0.
 \end{aligned}$$

Darin sind folgende Abkürzungen verwendet:

$$\begin{aligned}
 K_{12} &= J_{12} + j_{10}, & K_{11} &= J_{11} - j_9, \\
 K_{10} &= J_{10} - j_{10} n_0^2 + j_8, & K_9 &= J_9 + j_9 n_0^2 + j_7, \\
 K_8 &= J_8 - j_8 n_0^2 + j_6, & K_7 &= J_7 + j_7 n_0^2 + j_5, \\
 K_6 &= J_6 - j_6 n_0^2 + j_4, & K_5 &= J_5 + j_5 n_0^2 + j_3, \\
 K_4 &= J_4 - j_4 n_0^2 + j_2, & K_3 &= J_3 + j_3 n_0^2 + j_1, \\
 K_2 &= J_2 - j_2 n_0^2 + j_0, & K_1 &= J_1 + j_1 n_0^2, \\
 K_0 &= J_0 - j_0 n_0^2.
 \end{aligned}$$

---


$$\begin{aligned}
 J_{12} &= H_6^2, & J_{11} &= 2 H_5 H_6, \\
 J_{10} &= H_5^2 + 2 H_4 H_6, & J_9 &= 2 (H_4 H_5 - H_3 H_6), \\
 J_8 &= H_4^2 - 2 (H_3 H_5 + H_2 H_6), & J_7 &= 2 (H_3 H_4 + H_2 H_5 - H_1 H_6), \\
 J_6 &= H_3^2 - 2 (H_2 H_4 - H_1 H_5 - H_0 H_6), & J_5 &= 2 (H_2 H_3 + H_1 H_4 + H_0 H_5), \\
 J_4 &= H_2^2 - 2 (H_1 H_3 - H_0 H_4), & J_3 &= 2 (H_1 H_2 + H_0 H_3), \\
 J_2 &= H_1^2 - 2 H_0 H_2, & J_1 &= 2 H_0 H_1, \\
 J_0 &= H_0^2.
 \end{aligned}$$


---

$$\begin{aligned}
 j_{10} &= h_5^2, & j_9 &= 2 h_4 h_5, \\
 j_8 &= h_4^2 - 2 h_3 h_5, & j_7 &= 2 (h_3 h_4 + h_2 h_5), \\
 j_6 &= h_3^2 - 2 (h_2 h_4 - h_1 h_5), & j_5 &= 2 (h_2 h_3 + h_1 h_4 + h_0 h_5), \\
 j_4 &= h_2^2 - 2 (h_1 h_3 - h_0 h_4), & j_3 &= 2 (h_1 h_2 + h_0 h_3), \\
 j_2 &= h_1^2 - 2 h_0 h_2, & j_1 &= 2 h_0 h_1, \\
 j_0 &= h_0^2.
 \end{aligned}$$


---

$$H_6 = E_6 - G_6,$$

$$H_5 = G_5,$$

$$H_4 = E_4 - G_4,$$

$$H_3 = G_3,$$

$$H_2 = E_2 + G_2,$$

$$H_1 = G_1,$$

$$H_0 = E_0 - G_0.$$


---

$$h_4 = g_4,$$

$$h_5 = e_5 + g_5,$$

$$h_2 = g_2,$$

$$h_3 = e_3 + g_3,$$

$$h_0 = g_0.$$


---

$$G_6 = F_3^2 - f_2^2,$$

$$G_5 = 2 F_2 F_3,$$

$$G_4 = F_2^2 - 2 F_1 F_3 + f_2^2 n_0^2 + 2 f_0 f_2,$$

$$G_3 = 2 (F_0 F_3 + F_1 F_2),$$

$$G_2 = F_1^2 - 2 F_0 F_2 - f_0^2 - 2 f_0 f_2 n_0^2,$$

$$G_1 = 2 F_0 F_1,$$

$$G_0 = F_0^2 + f_0^2 n_0^2.$$


---

$$g_4 = 2 F_2 f_2,$$

$$g_5 = 2 F_3 f_2,$$

$$g_2 = 2 (F_2 f_0 + F_0 f_2),$$

$$g_3 = 2 (F_3 f_0 + F_1 f_2),$$

$$g_0 = 2 F_0 f_0.$$


---

$$g_1 = 2 F_1 f_0,$$

$$F_3 = \left( \frac{n_E}{n_0} - 2 \right) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2},$$

$$F_2 = C + C \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2},$$

$$F_1 = (n_E n_0 - 2 n_0^2) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2},$$

$$F_0 = C n_0^2.$$


---

$$f_2 = \frac{n_E}{n_0},$$

$$f_0 = n_E n_0.$$


---

$$E_6 = \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2} - 1,$$

$$E_4 = n_E^2 + 2 n_0^2 - (n_E^2 + n_0^2) \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2},$$

$$E_2 = 2 n_E^2 n_0^2 + n_0^4 - n_E^2 n_0^2 \operatorname{tg}^2 \frac{\gamma}{2},$$

$$E_0 = n_E^2 n_0^4.$$


---

$$e_3 = 2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2},$$

$$e_3 = 2 (n_E^2 + n_0^2) \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2},$$

$$e_1 = 2 n_E^2 n_0^2 \operatorname{tg} \frac{\gamma}{2}.$$

$$C = R/D_0.$$

Die Gleichung wurde unter den Voraussetzungen  $D_0 = 997\,000\, m\mu$  und  $D_0 = 10^6\, m\mu$ ,  $R = 0,5\, \lambda$ ;  $1\, \lambda$ ; ...;  $7\, \lambda$ ,  $\gamma = 30''$ ,  $1'$ ,  $5'$  und  $\lambda = 589,3\, m\mu$  durchgerechnet. Die Resultate (Mittelwerte der beiden reellen Lösungen) sind Gegenstand der Tab. 3.

Tabelle 3

Werte zum Einfluß des Keilfehlers  $\gamma$  auf den der Funktionstafel entnommenen Gangunterschied  $R_K$ . Tabelliert sind die Differenzen  $\Delta R_K = R - R_K$ . In den angemerkten drei Fällen druckte die Maschine nicht aus.

R	$D_0 = 997\,000\, m\mu$			$D_0 = 1\,000\,000\, m\mu$		
	$\gamma/2 = 30''$	$\gamma/2 = 1'$	$\gamma/2 = 5'$	$\gamma/2 = 30''$	$\gamma/2 = 1'$	$\gamma/2 = 5'$
0,5 $\lambda$	+ 0,9 $m\mu$	+ 0,9 $m\mu$	+ 0,9 $m\mu$	— 0,0 $m\mu$	— 0,0 $m\mu$	— 0,0 $m\mu$
1	+ 2,0	+ 2,0	+ 2,0	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2
1,5	+ 2,7	+ 2,7	+ 2,8	+ 0,0	+ 0,0	+ 0,1
2	+ 3,7	+ 7,1	+ 3,7	+ 0,0	+ 0,0	+ 0,0
2,5	+ 4,6	+ 4,6	+ 4,7	+ 0,1	+ 0,1	+ 0,1
3	+ 5,3	+ 5,4	+ 5,4	+ 0,0	—	+ 0,0
4	+ 7,1	—	+ 7,1	— 0,1	+ 4,3	+ 0,0
4,5	+ 8,1	+ 8,1	+ 8,1	+ 0,2	+ 0,2	+ 0,2
5	+ 9,0	+ 9,0	+ 9,0	+ 0,1	+ 0,0	+ 0,2
5,5	+ 10,0	+ 10,0	+ 10,0	+ 0,1	+ 4,4	+ 0,2
6	+ 10,6	+ 10,6	+ 10,7	+ 0,0	+ 0,0	+ 0,1
6,5	+ 11,5	+ 11,5	+ 11,6	— 0,0	+ 0,0	+ 0,1
7	+ 12,4	—	+ 12,5	— 0,2	— 0,2	— 0,0

Von geringen Schwankungen abgesehen, die ohnehin kleiner sind als der Messungsfehler, haben gleich große Einsätze  $D_0$  im allgemeinen unabhängig von  $\gamma$  auch gleiche  $\Delta R_K$  zur Folge. Nur in drei Fällen ergeben sich erheblich größere Ausschläge, wie dies aus den unter Einbeziehung des Messungsfehlers von  $\pm 1\, m\mu$  gegebenen Darstellungen Abb. 11 hervorgeht.

Eine vierte starke Auslenkung dürfte im Falle  $D_0 = 997\,000\, m\mu$  bei  $R = 4\, \lambda$  vorhanden sein, da die mit  $D_0 = 10^6\, m\mu$  gerechnete Wertfolge an zwei Stellen von einer verbindenden Geraden abweicht und wegen der Gleichheit der  $\gamma$  in beiden Fällen eine zweite Zacke auch in der oberen Darstellung erwartet werden muß.  $R = 0\, \lambda$  führt auf einen Wert nahe null, während sich bei  $R = 7\, \lambda$  schon im Hinblick auf die in der Tab. 2 zum Ausdruck kommende Tendenz ein erneuter Anstieg abzeichnen müßte. Dann aber würde die obere Kurve befriedigende Übereinstimmung mit der von MOSEBACH experimentell ermittelten zeigen. Der Ansatz  $\gamma/2 = 1'$  erscheint plausibel; exakte Daten waren nicht erhältlich.

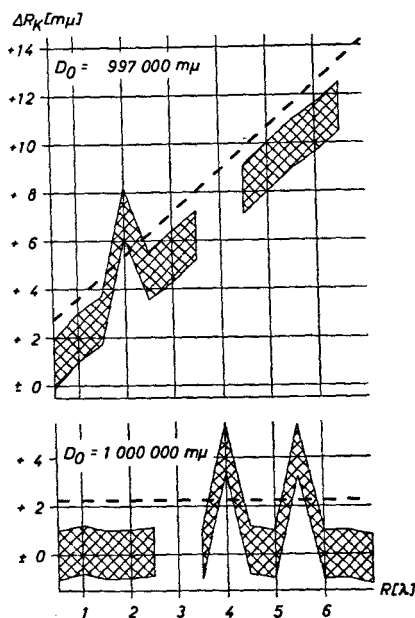


Abb. 11: Abweichungen  $\Delta R_K$  vom kompensierten Gangunterschied  $R = (k/2)\lambda$  ( $k = \text{ganze Zahl}$ ). Den zwischenliegenden Werten kommt keine physikalische Realität zu, da man ohne Hilfspräparat nicht auf  $R \neq (k/2)\lambda$  kompensieren kann; die Verbindung der Werte entspricht der allgemeinen Gepflogenheit.

#### 4. Auswirkung von Fehlern in der Orientierung der Quarzplättchen gegen ihre Indexflächen

Die zur Drehungsachse des Kompensators senkrechte, die Tubusachse enthaltende Ebene werde Arbeitsebene des Kompensators genannt. Bei fehlerfreier Orientierung ist die Hauptachse des unteren Plättchens der Drehungsachse des Kompensators parallel, die des oberen schließt mit der Drehungsachse einen rechten Winkel ein. Infolgedessen schneiden sich Arbeitsebene und Indexfläche des unteren Plättchens in zwei Kreisen mit den Radien  $n_E$  und  $n_0$ , und Arbeitsebene und Indexfläche des oberen Plättchens in einer Ellipse mit den Hauptachsen  $n_E$  und  $n_0$  und einem Kreis mit dem Radius  $n_0$ . Bei fehlerhafter Orientierung des unteren Plättchens bleibt der Kreis mit dem Radius  $n_0$  als Schnittkurve erhalten, während der Kreis mit dem Radius  $n_E$  in eine Ellipse mit den Hauptachsen  $n_E$  und  $n_E'$  entartet. Bei fehlerhafter Orientierung des oberen Plättchens ist eine der beiden Schnittkurven nach wie vor ein Kreis vom Radius  $n_0$ ; statt der Ellipse mit den Hauptachsen  $n_E$  und  $n_0$  befindet sich aber nunmehr eine andere Ellipse in der Arbeitsebene, deren Hauptachsen  $n_E$  und  $n_0'$  sind, wobei  $n_E'$  eine Brechzahl mit einem Wert nahe  $n_E$ ,  $n_0'$  eine Brechzahl mit einem Wert nahe  $n_0$  bedeuten soll.

Zur Erfassung der fehlerhaften Orientierung des unteren Plättchens geht man von der exakten Orientierung aus und denkt sich die außerordentliche



Schale mit ihrer Hauptachse in der durch die Drehungsachse des Kompensators und die Tubusachse fixierten Ebene um den kleinen Winkel  $\nu$ , und in der zur vorgenannten senkrechten und die durch  $\nu$  gegebene Richtung enthaltenden Ebene um einen Winkel gedreht, der aus Gründen der Vereinfachung ebenfalls den Betrag  $\nu$  haben soll. Die Richtung der Hauptachse nach der ersten Drehung entspreche der Richtung der Normale des unteren Plättchens.

Zur weiteren Vereinfachung der Verhältnisse kann man sich das obere Plättchen in gleicher Weise fehlorientiert denken, sich eine Drehung um  $\nu$  innerhalb der idealen Arbeitsebene und eine zweite Drehung um  $\nu$  innerhalb derjenigen Ebene vorstellen, die durch die einmal translatierte Achse der Indexfläche und die Drehungsachse des Kompensators verläuft. Wegen der Gleichheit aller  $\nu$  sind auch die  $n_E'$  in beiden Fällen gleich groß, doch heben sich die eingeführten Fehler dadurch nicht auf. Geht man in Anpassung an die Fa. ZEISS von den von GIFFORD ([6], Tab. auf S. 336 und 337) im  $Na_D$ -Licht gemessenen Brechungszahlen  $n_E = 1,553366$ ,  $n_0 = 1,544256$  aus, so ergeben sich für  $n_E'$  folgende Werte:

$\nu$	$n_E'$
$0^\circ 15'$	1,553365
$0^\circ 30'$	1,553365
$1^\circ 00'$	1,553364

Schon daraus geht hervor, daß Orientierungsfehlern nur geringfügiger Einfluß beizumessen ist.

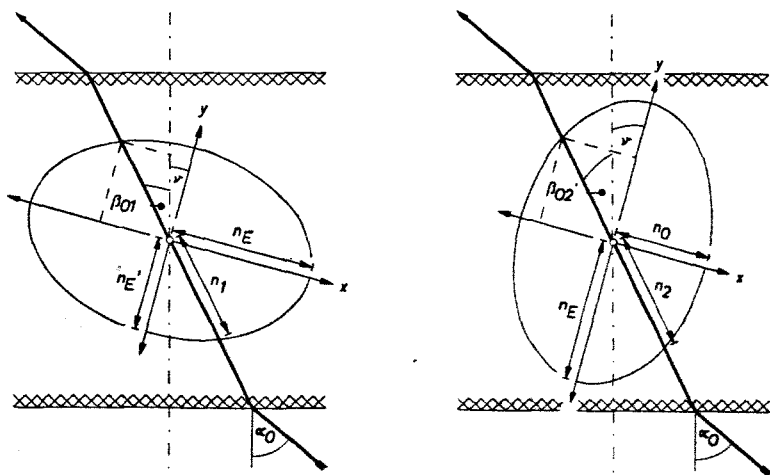


Abb. 12 und 13: Schemata zur Angabe eines Ausdrucks für die Brechungswinkel  $\beta_{01}'$  (unteres Plättchen) und  $\beta_{01}$  (oberes Plättchen). Die Drehungsachse des Kompensators steht auf der Zeichenebene senkrecht; die durch Schraffur hervorgehobenen Geraden deuten die Grenzflächen der Plättchen an.

Abb. 12

Nach:

Abb. 13

ist:

$$\frac{\sin^2(\beta_{01}' + \nu)}{n_E^2} + \frac{\cos^2(\beta_{01}' + \nu)}{n_E'^2} = \frac{1}{n_1^2}, \quad \frac{\sin^2(\beta_{02}' + \nu)}{n_0^2} + \frac{\cos^2(\beta_{02}' + \nu)}{n_E^2} = \frac{1}{n_2^2},$$

$$\operatorname{ctg} \beta_{01}' = -\frac{L_1}{2} + \sqrt{\frac{L_1^2}{4} - L_2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} L_3}, \quad \operatorname{ctg} \beta_{02}' = -\frac{M_1}{2} + \sqrt{\frac{M_1^2}{4} - M_2 + \frac{1}{\sin^2 \alpha_0} M_3},$$

und mit den gebräuchlichen Substituenten für  $\operatorname{ctg} \beta_{01}''$ :

$$R_1 = D_0 \left\{ -\frac{L_1}{2} \sin \alpha_0 + \sqrt{\left(\frac{L_1^2}{4} - L_2\right) \sin^2 \alpha_0 + L_3} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_0} \right\},$$

$$R_2 = D_0 \left\{ -\frac{M_1}{2} \sin \alpha_0 + \sqrt{\left(\frac{M_1^2}{4} - M_2\right) \sin^2 \alpha_0 + M_3} - \sqrt{n_0^2 - \sin^2 \alpha_0} \right\}.$$

Die verwendeten Abkürzungen haben folgende Bedeutungen:

$$L_1 = \frac{(n_E'^2 - n_E^2) \sin^2 \nu}{n_E^2 \sin^2 \nu + n_E'^2 \cos^2 \nu}, \quad M_1 = \frac{(n_E^2 - n_0^2) \sin^2 \nu}{n_E^2 \sin^2 \nu + n_0^2 \cos^2 \nu},$$

$$L_2 = \frac{n_E^2 \sin^2 \nu + n_E'^2 \cos^2 \nu}{n_E'^2 \sin^2 \nu + n_E^2 \cos^2 \nu}, \quad M_2 = \frac{n_0^2 \sin^2 \nu + n_E^2 \cos^2 \nu}{n_E^2 \sin^2 \nu + n_0^2 \cos^2 \nu},$$

$$L_3 = \frac{n_E^2 n_E'^2}{n_E^2 \sin^2 \nu + n_E'^2 \cos^2 \nu}, \quad M_3 = \frac{n_E^2 n_0^2}{n_E^2 \sin^2 \nu + n_0^2 \cos^2 \nu}.$$

Für den Gangunterschied  $R$  resultiert der Ausdruck:

$$R_1 - R_2 = R = D_0 (N \sin \alpha_0 + \sqrt{L \sin^2 \alpha_0 + L_3} - \sqrt{M \sin^2 \alpha_0 + M_3}),$$

dessen Auflösung nach  $\sin \alpha_0$  eine Gleichung 4. Grades allgemeiner Form ist

$$\sin^4 \alpha_0 - S_3 \sin^3 \alpha_0 + S_2 \sin^2 \alpha_0 - S_1 \sin \alpha_0 + S_0 = 0.$$

Dabei ist:

$$Q_4 = P_2^2 - 4 LM, \quad S_3 = Q_3/Q_4, \quad Q_3 = 2 P_1 P_2, \quad Q_2 = P_1^2 + 2 P_0 P_2 - 4 (L_3 M + M_3 L), \quad P_2 = N^2 - L - M,$$

$$S_2 = Q_2/Q_4, \quad Q_1 = 2 P_0 P_1, \quad P_1 = 2 (R^2/D_0^2) N, \quad S_1 = Q_1/Q_4, \quad Q_0 = P_0^2 - 4 L_3 M_3, \quad P_0 = (R^2/D_0^2) - L_3 - M_3,$$

$$S_0 = Q_0/Q_4, \quad N = (M_1 - L_1)/2, \quad M = (M_1^2/4) - M_2, \quad L = (L_1^2/4) - L_2.$$

Der Ausdruck für  $R$  hat zwei reelle Lösungen, deren zweite einem zu den Abb. 12 und 13 symmetrischen Lichtdurchgang entspricht. Zu den arithmetischen Mittelwerten der beiden Lösungen ergibt die Funktionstafel Gangunterschiede, die von den kompensierten um die in der Tab. 4 aufgeführten Beträge differieren.

Tabelle 4  
Gangunterschiedsdifferenzen in  $[m\mu]$  bei fehlerhafter Orientierung  $\nu$  der beiden Quarzplättchen.

$R$	$\nu$					
	5'	10'	15'	20'	25'	30'
0,5 $\lambda$	-0,0	+0,0	+0,1	+0,2	+0,4	+0,7
1	+0,2	+0,2	+0,4	+0,5	+0,7	+0,9
1,5	+0,1	+0,1	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8
2	+0,0	+0,1	+0,2	+0,4	+0,6	+0,8
2,5	+0,1	+0,2	+0,4	+0,5	+0,7	+1,0
3	+0,0	+0,1	+0,3	+0,4	+0,7	+0,9
3,5	+0,0	+0,1	+0,3	+0,4	+0,7	+0,9
4	+0,0	-0,1	+0,2	+0,4	+0,7	+1,0
4,5	+0,2	+0,2	+0,5	+0,6	+0,9	+1,2
5	+0,1	+0,2	+0,4	+0,7	+1,0	+1,5
5,5	+0,2	+0,3	+0,5	+0,7	+1,2	+1,6
6	+0,0	+0,2	+0,4	+0,8	+1,2	+1,8
6,5	+0,1	+0,3	+0,6	+1,0	+1,5	+2,2
7	+0,2	+0,2	+0,6	+1,2	+1,9	+2,9

Offensichtlich wirken sich kleine Orientierungsfehler in nur geringem Maße aus, während Abweichungen von 25 bis 30' sicher außerhalb der vorgegebenen Toleranzen liegen.

### 5. Einfluß von Fehlern in der gegenseitigen Orientierung der Quarzplättchen, Einfluß der Gyration

Wegen der Zusammensetzung des EHRINGHAUS-(Quarz-)Kompensators aus zwei Plättchen ist außer der Orientierung der Einzelplättchen zu ihren optischen Bezugselementen auch die gegenseitige optische Orientierung dieser Plättchen von Interesse. *BEREK* [7] hat hierzu Stellung genommen.  $R = \lambda$  ergibt unabhängig von der Größe der einzelnen Fehler keine Abweichung, Fehler von anderthalb Grad erzeugen Werte  $\Delta R$  von etwa einem halben Millimikron, zwei Umstände, die als Beweis ausreichen, daß Fehler in der gegenseitigen Orientierung höchstens einen schwach modulierenden, sicher aber keinen bildbestimmenden Einfluß haben.

Dem Drehungsvermögen ist ebenfalls keine Bedeutung beizumessen, da die Quarzplättchen, wenn auch nicht in der günstigsten Orientierung (Abb. 14), so doch in einer Schnittrichtung entnommen sind, in der die Gyration den Gangunterschied bis zur fünften Dezimale nicht verändert.

Die Lösungen der angegebenen Gleichungen wurden im Recheninstitut der Technischen Hochschule Hannover mit dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Verfügung gestellten IBM-Magnettrommelrechner Type 650 vorgenommen. Den Herren Professoren *UNGER* und *JAECKEL* sei auch an dieser Stelle für ihr freundliches Entgegenkommen gedankt.

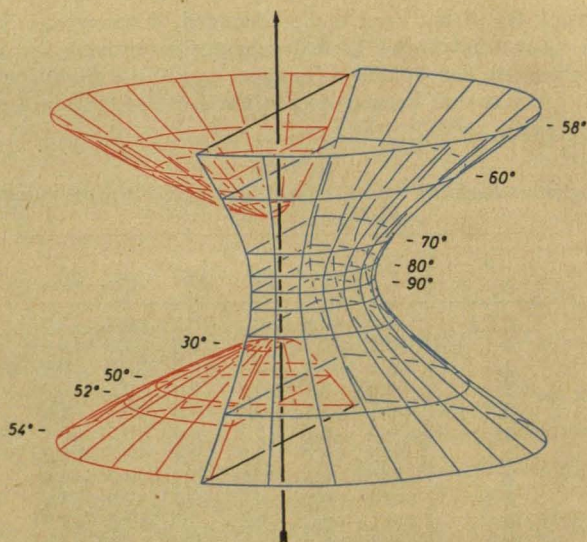


Abb. 14: Mittlerer Teil der Gyrationfläche von Quarz. Die Fläche besteht aus zwei konjugierten Rotationshyperboloiden mit  $a = 87,8$ ,  $b = 131$  (zweischaliges Rotationshyperboloid) und  $a = 131$ ,  $b = 87,8$  (einschaliges Rotationshyperboloid) und der kristallographischen Hauptachse als Rotationsachse. Die Werte von  $a$  und  $b$  sind einer Arbeit von *Szivesy* und *Münster* [8] entnommen. Die Hyperboloide sind nur für einen Sektor  $\pi$  der zur Hauptachse senkrechten Symmetrieebene der Figur gezeichnet. Zwischen den beiden Hyperboloiden liegt (mit der Achse den Winkel  $56^\circ 10'$  bildend) der (hier weggelassene) Asymptotenkegel. Senkrecht zu einer Mantellinie des Asymptotenkegels geschliffene Platten zeigen keine optische Aktivität.

## Literatur

- [1] *Burri, C.*, Das Polarisationsmikroskop. Verlag Birkhäuser, Basel, 1950.
- [2] *Ehringhaus, A.*, Drehbare Kompensatoren aus Kombinationsplatten doppelbrechender Kristalle. Zeitschrift für Kristallographie 76 (1931), S. 315 bis 321.
- [3] *Ehringhaus, A.*, Ein Drehkompensator aus Quarz mit großem Meßbereich bei hoher Meßgenauigkeit. Zeitschrift für Kristallographie A 98 (1938), S. 394 bis 406.
- [4] *Mosebach, R.*, Das Messen optischer Gangunterschiede mit Drehkompensatoren. Heidelberger Beiträge zur Mineralogie 1 (1947/49), S. 515 bis 528.
- [5] Drehkompensator mit Kombinationsplatte aus Quarz nach *Ehringhaus*. Funktionstafel. Druckschrift 555/G der Fa. Winkel, Göttingen.
- [6] *Gifford, J. W.*, Indices of fluorite, quartz, and calcite. Proceedings of the Royal Society of London 70 (1902), S. 329 bis 340.
- [7] *Berek, M.*, Zur Messung der Doppelbrechung hauptsächlich mit Hilfe des Polarisationsmikroskops. Zentralblatt für Mineralogie (1913), S. 388 bis 396, 427 bis 435, 464 bis 470 und Berichtigung dazu S. 580 bis 582.
- [8] *Szivesy, G. und Münster, Cl.*, Über die Prüfung der Gitteroptik bei aktiven Kristallen. Annalen der Physik 5. Folge 20 (1934), S. 703 bis 736.